

Е. А. ФРОЛОВ, С. Г. ЯСЬКО, В. В. АГАРКОВ, С. И. КРАВЧЕНКО

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАЗДЕЛЕНИЯ ЛИСТОВОГО МАТЕРИАЛА ЭЛАСТИЧНОЙ СРЕДОЙ

Показаны пути совершенствования вырезки деталей эластичной средой, способствующие повышению геометрической точности среза. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования процесса разделения листового металла эластичной средой позволили установить пути совершенствования вырубki, пробивки. Определено, что в зависимости от допустимой деформации сдвига материала заготовки возможны два механизма разрушения, приводящие к неодинаковой форме среза полученной детали. В процессе разделения листовой заготовки эластичной средой реализуются следующие этапы: изгиб заготовки около острой кромки шаблона, сдвиг разделяемых частей и изгиб припуска с растяжением вплоть до их разделения. Улучшение геометрической точности поверхности среза при толщине заготовки более 1 мм реализуется в схемах с локализацией очага пластической деформации и управления траекторией трещины разрушения, отделения припуска при небольших углах его изгиба и изменения схемы нагружения разделяемого припуска, а также за счет повышения упругости эластичной среды. Без усложнения оснастки, локализацию очага пластической деформации можно обеспечить при последовательном отделении припуска. Такой характер разделения создается конструктивными элементами штампов, обеспечивающими последовательное увеличение давления эластичной среды вдоль контура среза. Локализация давления обеспечивает разделение припуска сначала в одной зоне контура детали, а затем и в остальных. При этом за счет меньшего угла изгиба припуска к моменту образования трещины снижается утонение заготовки в зоне разделения. В пневмоударной установке модели ТА-1324 это реализуется за счет эластичного блока имеющего переменную толщину. В предлагаемом методе разделения деталей сложных контуров это достигается путем изменения высоты шаблона в пределах от 1,5 до 3-3,5 толщин заготовки, тогда трещина разрушения появляется при меньших углах изгиба припуска и тем самым обеспечивается разделение при меньшем утонении заготовки в зоне разделения. Предложенные пути совершенствования пневмоударной штамповки обеспечивают вырубку, пробивку деталей из листовых медных, алюминиевых сплавов толщиной 0,3...10 мм и малоуглеродистой стали толщиной до 2 мм. Достигаемая шероховатость поверхности среза на деталях составляет $Ra=0,3...0,6$ мкм, а в случае высокопрочных материалов толщиной до 4...5 мм с шероховатостью поверхности среза $Ra=0,6...1,0$ мкм.

Ключевые слова: пробивка, вырубка, тонкий, лист, пневмоударная, штамповка, эластичная, среда, полиуретан.

Є. А. ФРОЛОВ, С. Г. ЯСЬКО, В. В. АГАРКОВ, С. І. КРАВЧЕНКО

ВДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСІВ РОЗДІЛЕННЯ ЛИСТОВОГО МАТЕРІАЛУ ЕЛАСТИЧНИМ СЕРЕДОВИЩЕМ

Показано шляхи вдосконалення вирізання деталей еластичним середовищем, що сприяє підвищенню геометричної точності зрізу. Проведені теоретичні та експериментальні дослідження процесу розділення листового металу еластичним середовищем дозволили встановити шляхи вдосконалення операцій вирубвання та пробивання. Визначено, що в залежності від допустимої деформації зсуву матеріалу заготовки можливі два механізми руйнування, які призводять до неоднакової форми зрізу отриманої деталі. У процесі розділення листової заготовки еластичним середовищем реалізуються наступні етапи: вигин заготовки коло гострої кромки шаблону, зрушення частин, що розділяються і вигин припуску з розтягуванням аж до їх розділу. Поліпшення геометричної точності поверхні зрізу при товщині заготовки більше 1 мм реалізується в схемах з локалізації осередку пластичної деформації та управління траєкторією тріщини руйнування, відділення припуску при невеликих кутах його вигину і зміні схеми навантаження припуску, що розділяється, а також за рахунок підвищення пружності еластичного середовища. Без ускладнення оснащення, локалізацію осередку пластичної деформації можна забезпечити при послідовному відділенні припуску. Такий характер поділу створюється конструктивними елементами штамів, що забезпечують послідовне збільшення тиску еластичного середовища уздовж контуру зрізу. Локалізація тиску забезпечує поділ припуску спочатку в одній зоні контуру деталі, а згодом і в інших. При цьому за рахунок меншого кута вигину припуску до моменту утворення тріщини знижується потоншення заготовки в зоні поділу. У пневмоударній установці моделі ТА-1324 це реалізується за рахунок еластичного блоку, що має змінну товщину. У запропонованому методі поділу деталей складних контурів це досягається шляхом зміни висоти шаблону в межах від 1,5 до 3-3,5 товщини заготовки, тоді тріщина руйнування з'являється при менших кутах вигину припуску і тим самим забезпечується поділ при меншому потонненні заготовки в зоні поділу. Запропоновані шляхи вдосконалення пневмоударного штампування забезпечують вирубвання і пробивання деталей з листових мідних, алюмінієвих сплавів товщиною 0,3...10 мм та малоуглецевої сталі товщиною до 2 мм. Шорсткість поверхні зрізу, що досягається, на деталях складає $Ra=0,3...0,6$ мкм, а в разі висококомірних матеріалів товщиною до 4...5 мм з шорсткістю поверхні зрізу $Ra=0,6...1,0$ мкм.

Ключові слова: пробивання, вирубвання, тонкий, лист, пневмоударне, штампування, еластичне, середовище, поліуретан.

Ye. FROLOV, S. YASKO, V. AGARKOV, S. KRAVCHENKO

PERFECTION OF THE PROCESSES OF SEPARATION OF SHEET MATERIAL BY ELASTIC MEDIUM

The ways to improve the cutting of parts by an elastic medium are shown, contributing to an increase in the geometric accuracy of the cut. Theoretical and experimental studies of the process of sheet metal separation by an elastic medium made it possible to establish ways to improve cutting, punching. It was determined that, depending on the allowable shear deformation of the workpiece material, two mechanisms of destruction are possible, leading to an unequal cut shape of the obtained part. In the process of separating a sheet blank with an elastic medium, the following steps are implemented: bending the blank near the sharp edge of the template, shifting the parts to be divided and bending the allowance with stretching until they separate. Improving the geometric accuracy of the cut surface when the workpiece thickness is more than 1 mm is implemented in schemes with localization of the center of plastic deformation and control of the fracture crack trajectory, separation of the seam allowance at small bending angles and changes in the loading scheme of the partial seam allowance, as well as by increasing the elasticity of the elastic medium. Without complication of tooling, the localization of the source of plastic deformation can be achieved by sequential separation of the allowance. This type of separation is created by structural elements of the dies, which ensure a consistent increase in the pressure of the elastic medium along the contour of the slice. Localization of pressure ensures the separation of the allowance, first in one zone of the part contour, and then in the rest. At the same time, due to the smaller bending angle of the allowance, at the moment of crack formation, the thinning of the workpiece in the separation zone is reduced. In the pneumatic impact installation model TA-1324, this is realized by an elastic block having a variable thickness. In the proposed method of separation of parts of complex contours, this is achieved by changing the height of the template in the range from 1.5 to 3-3.5 thicknesses of the workpiece, then the fracture crack appears at smaller bending angles of the stock and thus provides separation with less thinning of the workpiece in the separation zone. The proposed ways to improve pneumatic impact stamping provide cutting, punching of parts from sheet copper, aluminum alloys with a thickness of 0.3...10 mm and mild steel up to 2 mm thick. The achieved roughness of the cut surface on details is $Ra=0,3...0,6$ μm, and in the case of high-strength materials with a thickness of 4...5 mm with a roughness of the cut surface $Ra=0,6...1,0$ μm.

Keywords: punching, cutting, thin sheet, pneumatic impact, stamping, elastic, medium, polyurethane.

Введение. Разделительные операции в металлообрабатывающей промышленности – вырубка, пробивка, выполняемые методом штамповки эластичной средой (полиуретан), получили широкое распространение благодаря простоте и универсальности применяемой штамповой оснастки и существующего прессового оборудования.

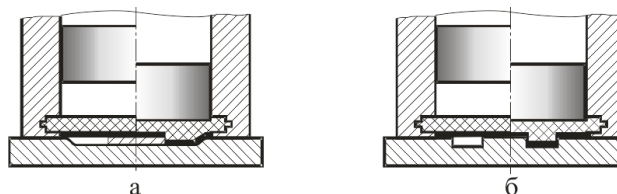


Рис. 1 – Основные технологические схемы штамповки эластичной средой (полиуретаном марки СКУ-7Л, СКУ-ПФЛ): а – пробивка, б – вырубка

Значительные скорости деформирования и высокий уровень развиваемого импульсного давления, как показали сравнительные исследования, позволяют существенно повысить качество и точность листовых деталей при разделительных операциях (пробивка, вырубка) [6–7].

Исследование процессов разделения листового материала эластичной средой толщиной более 1,0 мм и при этом повышение геометрической точности среза представляется актуальной задачей.

Цель работы: установление путей совершенствования пневмоударных разделительных процессов листовой штамповки на основании исследований закономерностей пластического течения, разрушения и формирования поверхности среза.

Основной материал. Как показывает практика и результаты исследований, выполненных в ряде известных работ [1,2], при разделении листового материала эластичной средой на срезе имеется характерная утяжина, что существенно снижает качество получаемых деталей. Величина утяжины растет с увеличением толщины заготовки, высоты шаблона, с уменьшением отношения σ_T/σ_B и др.

Закономерности развития деформации установлены с учетом характера нагружения заготовки при разделении в штампах с одной эластичной рабочей частью. Процесс включает такие этапы: изгиб заготовки около острой кромки шаблона, сдвиг разделяемых частей и изгиб припуска с растяжением вплоть до разделения частей.

На первом этапе поле линий скольжения подобно полю при гибке широкой полосы (Рис. 2, а). Отличием является действие сосредоточенной силы вдоль контура разделения вследствие некоторого отставания заготовки от плоскости шаблона.

Анализ проблемы и постановка задачи исследования. Существенным недостатком статического метода штамповки является наличие заусенцев на деталях, а это в свою очередь требует дополнительных затрат для их удаления и улучшения качества среза [1–5].

Одним из направлений повышения геометрической точности детали – это использование процесса пневмоударной штамповки эластичной средой (рис. 1).

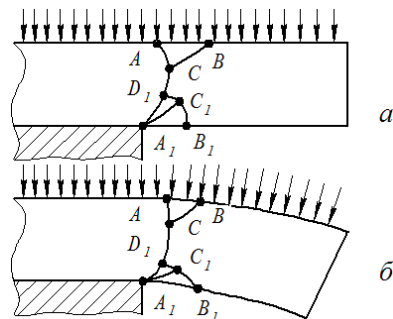


Рис. 2 – Поле линий скольжения на первом этапе разделения: а – начальный момент, б – следующий момент

Среднее нормальное напряжение вдоль АВ будет $\sigma_{AB} = k - q$, а вдоль A_1B_1 $\sigma_{A_1B_1} = -k$ (здесь k – сопротивление материала заготовки сдвигу). Треугольные области поверхностей листовой заготовки соединяются изолированной линией скольжения, если $k_{ABC} \neq k_{A_1B_1C_1}$ или имеют общую точку разрыва напряжений при $k_{ABC} = k_{A_1B_1C_1}$.

Угол изолированной круговой линии скольжения определим из соотношения

$$\frac{q}{2k} + \varepsilon + \delta = 1, \quad (1)$$

где ε, δ – углы веера $C_1A_1D_1$ и линии D_1C соответственно.

Увеличение давления среды (q) ведет к снижению суммы $\varepsilon + \delta$, т.е. к сокращению и отклонению области ABC в сторону припуска, спрямлению дуги D_1C (Рис. 2, б).

Поле линий скольжения, реализующееся на втором этапе разделения показано на рис. 3, а. Вдоль контура bc среднее напряжение k , а внутри области abc напряженное состояние описывается зависимостями:

$$\sigma_r = 2k \ln \frac{\rho}{r}; \quad (2)$$

$$\sigma_\varphi = 2k \left(1 - \ln \frac{\rho}{r} \right), \quad (3)$$

где ε, δ – радиусы наружного контура и контура на котором находится рассматриваемый участок;

σ_r, σ_φ – радиальные и тангенциальные напряжения в рассматриваемой точке.

Растягивающие напряжения на участке bc переходят затем на участке c_1c_2 в сжимающие. В силу этого вблизи точки b наблюдается наиболее жесткая

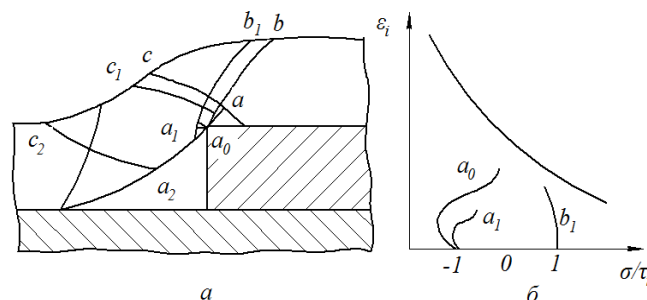


Рис. 3 – Поле линий скольжения: а – реализующееся на втором этапе; б – накопление интенсивности деформации сдвига

При разделении пластичных материалов разрушения на ранней стадии не происходит, так как в окрестности точки b_1 $\varepsilon_i < \varepsilon_{i\text{np}}$. Здесь $\varepsilon_{i\text{np}}$ – допустимая интенсивность деформации сдвига при $\sigma/\tau_i = 1$.

По мере внедрения шаблона в заготовку усиливается локализация интенсивной деформации у его кромки, т.е. в окрестности точки a_0 , а также вдоль линии a_0b . Следует заметить, что на этом этапе, как и ранее, наложение давления вдоль bc способствует сокращению треугольной области abc и отклонению ее в сторону припуска.

С ростом давления q , как видно из соотношения

$$\frac{q' - q}{2k} = \delta + \varepsilon, \quad (4)$$

на поверхности контакта заготовки с шаблоном растет кривизна сторон треугольника abc , что свидетельствует о снижении радиуса скругления среза. Трещина зарождается у кромки a_0 и развивается вдоль a_0b , где интенсивность деформации сдвига получает наибольшее приращение.

Таким образом, в зависимости от допустимой интенсивности деформации сдвига может реализоваться один из двух рассмотренных механизмов разрушения, приводящих к характерной форме среза. На рис. 4 показаны примеры срезов деталей из пластичных (а) и малопластичных (б) материалов. Анализ геометрической формы срезов у различных материалов показал хорошее совпадение их с показанными теоретическими. Видно, что управление траекторией трещины разрушения путем

схема напряженного состояния, характеризуемая показателем $\sigma/\tau_i = 1$ (τ_i – интенсивность касательных напряжений; $\tau_i = k$ на линиях скольжения).

Накапливание интенсивности деформаций сдвига ε_i идет, как показано на рис. 3, б. На ранних стадиях процесса в окрестности точки b_1 (рис. 3, а) возможно появление трещины разрушения, поскольку здесь наиболее интенсивно идет исчерпание ресурса пластичности. Для малопластичных материалов, например БрБ2Т, трещина зарождается на поверхности заготовки в окрестности точки b_1 и развивается вдоль линии скольжения b_1a_1 .

изменения пластических свойств материала ограничено.

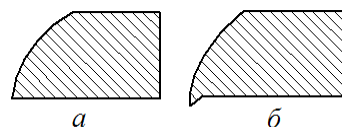


Рис. 4 – Примеры среза деталей: а – пластичных материалов, б – малопластичных

Эффективнее будут пути, приводящие к уменьшению утонения заготовки в зоне изгиба к моменту разрушения и предопределяющие целесообразное направление трещины.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования процесса разделения листового металла эластичной средой позволили установить пути совершенствования вырубки, пробивки. В основу положено улучшение геометрической точности поверхности среза при толщине заготовки более 1 мм. Это направление реализуется в схемах локализации очага пластической деформации и управления траекторией трещины разрушения, отделения припуска при небольших углах его изгиба и изменения схемы нагружения разделяемого припуска, а также за счет повышения твердости эластичной среды.

Особо следует отметить, что улучшение технологических параметров процесса вырубki, пробивки листового металла эластичной средой не должно проходить при увеличении сложности штамповой оснастки, так как при этом теряется основное преимущество процесса – простота, легкость изготовления инструмента, малая себестоимость.

Не прибегая к усложнению оснастки, локализацию очага пластической деформации можно обеспечить при последовательном отделении припуска. Такой характер разделения создается конструктивными элементами штампов, обеспечивающими последовательное увеличение давления эластичной среды вдоль контура среза. Локализация давления обеспечивает разделение припуска сначала в одной зоне контура детали. При этом за счет меньшего угла изгиба припуска к моменту образования трещины снижается утонение заготовки в зоне разделения. Это направление реализуется за счет имеющего переменную толщину эластичного блока в пневмоударной установке модели ТА-1324. В этом случае разделение заготовки начинается в зоне, соответствующей меньшей толщине блока эластичной среды, так как здесь больше локальное давление и выше степень деформации.

Аналогичные результаты достигаются в штампе, в котором обеспечивается переменный угол изгиба припуска вдоль контура вырубаемой детали.

В предлагаемом методе разделения деталей сложных контуров используется тот факт, что отделение припуска происходит одновременно по всему контуру детали. В этом случае трещины разрушения образуются сначала на участках с большой кривизной контура детали, так как здесь наиболее жесткая схема напряженно-деформированного состояния.

Управление формированием поверхности среза достигается путем изменения высоты шаблона в пределах от $H_1=1,5S$ (S – толщина стальной заготовки) до $H_2=(3-3,5)S$, тогда трещина разрушения появляется при меньших углах изгиба припуска и тем самым обеспечивается разделение при меньшем утонении заготовки в зоне разделения.

Предложенные пути совершенствования пневмоударной штамповки обеспечивают вырубку, пробивку деталей из листовых медных, алюминиевых сплавов толщиной 0,3..10 мм и малоуглеродистой стали толщиной до 2 мм. Достигаемая шероховатость поверхности среза на деталях составляет $Ra = 0,3...0,6$ мкм, а в случае высокопрочных материалов толщиной до 4...5 мм с шероховатостью поверхности среза $Ra = 0,6...1,0$ мкм.

Заключение. В процессе разделения листовой заготовки эластичной средой реализуются следующие этапы: изгиб заготовки около острой кромки шаблона, сдвиг разделяемых частей и изгиб припуска с растяжением вплоть до их разделения. В зависимости от допустимой деформации сдвига материала заготовки возможны два механизма разрушения, приводящие к неодинаковой форме среза полученной

детали. Показаны пути совершенствования вырезки деталей эластичной средой, способствующие повышению геометрической точности среза.

Список литературы

1. Исаченков Е. И. Основные направления повышения эффективности и качества листовой и объемной штамповки. *Качество и эффективность при листовой и объемной штамповке*, Москва: МДНТП, 1977. С. 3–8.
2. Комаров А. Д. Киселев В. А., Балычкова Е. М. Влияние технологических факторов на точность и качество деталей, вырезанных эластичной средой. *Повышение эффективности кузнечно-штампового производства. Тезисы докладов республиканской конференции*. Кишинев, 1977. С. 6–9.
3. Баранов Н. Ф. О механизме разделения металла при резке эластичной средой. *Кузнечно-штамповое производство*. 1981. № 3. С. 24–26.
4. Тимошенко В.А., Богоев В.С., *Разделение листового металла эластичными средами* / ред. Токи А. В. Кишинев: Штиинца, 1988. 106 с.
5. Кокорин В.Н. Титов Ю.А., Таловеров В. Н., Федорова Л.В. *Специальные способы обработки металлов давлением*. Ульяновск: УлГТУ, 2006. 36 с.
6. Фролов Е. А., Манаенков И. В., Дякова Т. В. Оценка качественных показателей деталей из листа при операциях пробивки – вырубки эластичной средой на пневмоударном оборудовании. *Збірник наукових праць УДАЗТ*. Харків: Українська державна академія залізничного транспорту. 2008. Вип. 99. С. 250–256.
7. Фролов Е. А., Мовшович А. Я., Манаенков И. В. и др. *Пневмоударная и статико-динамическая штамповка сложнорельефных листовых деталей упругими средами*. Харьков: УГАЖТ, Краматорск: ДГМА, 2010. 287 с.

References (transliterated)

1. Isachenkov Ye. I. *Shtampovka rezinoy i zhidkostyu* [Stamping with rubber and liquid]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1967. 364 p.
2. Komarov A. D. Kiselev V. A., Balychkova E. M. [The influence of technological factors on the accuracy and quality of parts cut by an elastic medium]. *Povyshenie effektivnosti kuznechno-shtampovogo proizvodstva. Tezisy dokladov respublikanskoi konferentsii* [Improving the efficiency of forging and stamping production. Abstracts of the Republican Conference]. Chisinau, 1977. pp 6–9.
3. Baranov N. F. O mekhanizme razdeleniya metalla pri rezke elastichnoi sredoi [On the mechanism of separation of the metal when cutting elastic medium]. *Kuznechno-shtampovoe proizvodstvo*. 1981, No. 3. pp. 24–26.
4. Timoshchenko V.A., Bogoev V.S., Toki A. V. *Razdelenie listovogo metalla elastichnymi sredami* [Separation of sheet metal by elastic media]. Chisinau: Shtiintsa, 1988. 106 p.
5. Kokorin V.N. Titov Yu.A., Taloverov V. N., Fedorova L.V. *Spetsial'nye sposoby obrabotki metallov davleniem* [Special methods of metal forming]. Ulyanovsk: USTU, 2006. 36 p.
6. Frolov E. A., Manaenkov I. V., Dyakova T. V. Assessment of the quality indicators of parts from a sheet during punching-cutting operations with an elastic medium on a pneumatic impact equipment. *Zbirnik naukovikh prats' UDAZT* [Collection of scientific works USART]. Xarkov: Ukrainian State Academy of Railway Transport. 2008. 99. pp. 250–256.
7. Frolov E. A., Movshovich A. Ya., Manaenkov I. V. i dr. *Pnevmoударная i statiko-dinamicheskaya shtampovka slozhnoreliefnykh listovykh detalei uprugimi sredami* [Pneumatic and static-dynamic stamping of sticky-relief sheet parts by elastic media]. Khar'kov: USART, Kramatorsk: DSMA, 2010. 287 p.

Поступила (received) 30.10.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Фролов Євгеній Андрійович (Фролов Евгений Андреевич, Frolov Yevgeniy) – доктор техн. наук, професор, ПолтНТУ ім. Юрія Кондратюка, м. Полтава, Україна. E-mail: frolov.polntu@gmail.com; ORCID: 0000-0002-2691-5386.

Ясько Станіслав Георгійович (Ясько Станислав Георгиевич, Yasko Stanislav) – ст. викладач, ПолтНТУ ім. Юрія Кондратюка, Полтава, Україна. E-mail: s.g.yasko@gmail.com; ORCID: 0000-0001-6228-705X.

Азарков Віктор Васильович (Азарков Виктор Васильевич, Agarkov Viktor) – канд. техн. наук, заст. директора-поч. лабораторії, Державне підприємство «Харківстандартметрологія», м.Харків, Україна. e-mail: 290@mtl.kharkov.ua.

Кравченко Сергій Іванович (Кравченко Сергей Иванович, Kravchenko Sergiy) – канд. техн. наук, доцент, ПолтНТУ ім. Юрія Кондратюка, Полтава, Україна. E-mail: 050Ser09@i.ua; ORCID: 0000-0003-3250-8645.